

多重光散射法研究弱碱三元驱油剂对乳状液稳定性的影响

常苏德¹, 徐春玲², 许雪³, 全泽乐¹, 侯宇涵¹, 黄金^{1*}

¹大庆师范学院黑龙江省油田应用化学与技术重点实验室, 黑龙江 大庆

²中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆

³连云港嘉澳新能源有限公司, 江苏 连云港

收稿日期: 2025年7月9日; 录用日期: 2025年8月20日; 发布日期: 2025年8月28日

摘要

化学驱是目前油田保持稳产的重要提高采收率技术, 化学驱的驱油剂是乳状液稳定的重要因素。本研究采用多重光散射法系统研究了弱碱三元驱油剂(部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)、石油磺酸盐和碳酸钠(Na_2CO_3))对乳状液稳定性的影响。以乳状液的水相透射光强平均值(T_{avg})和油相背散射光强平均值(BS_{avg})为参数分析了驱油剂对乳状液稳定性的影响规律。结果表明, 提高HPAM浓度可显著增加溶液粘度, 减缓乳化液滴的聚集和聚并, 从而增强乳状液稳定性; 增加石油磺酸盐浓度能显著降低油水界面张力, 提高界面剪切粘度和弹性, 进一步稳定乳化液滴; 而碳酸钠浓度的增加对乳状液稳定性的影响较为复杂, 当 Na_2CO_3 浓度 $\leq 1.00\%$ 时, 提高 Na_2CO_3 浓度乳状液的稳定性减弱; 当 Na_2CO_3 浓度为 1.20% 时, 油相乳化液滴的稳定性增强, 其作用与水相离子强度和界面张力变化密切相关。

关键词

多重光散射法, 乳状液, 石油磺酸盐, 部分水解聚丙烯酰胺

Effect of Weak Base ASP Flooding Agent on Emulsion Stability by Multiple Light Scattering Method

Sude Chang¹, Chunling Xu², Xue Xu³, Zele Tong¹, Yuhan Hou¹, Jin Huang^{1*}

¹Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Oilfield Applied Chemistry and Technology, Daqing Normal University, Daqing Heilongjiang

²Exploration and Development Research Institute of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing Heilongjiang

*通讯作者。

文章引用: 常苏德, 徐春玲, 许雪, 全泽乐, 侯宇涵, 黄金. 多重光散射法研究弱碱三元驱油剂对乳状液稳定性的影响[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(5): 237-245. DOI: 10.12677/hjct.2025.155023

Abstract

Chemical flooding is an important enhanced oil recovery technology for maintaining stable production in oil fields. The oil displacement agents employed in chemical flooding play an important role in emulsion stability. This study systematically investigated the effects of weak base ASP flooding agents-partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM), petroleum sulfonate and sodium carbonate (Na_2CO_3)-on emulsion stability using multiple light scattering analysis. The analysis employed two key parameters: average transmitted light intensity of the aqueous phase (T_{avg}) and average back-scattered light intensity of the oil phase (BS_{avg}). Experimental results demonstrate that increasing HPAM concentration significantly elevates solution viscosity, retards droplet aggregation and coalescence, thereby improving emulsion stability. Elevated petroleum sulfonate concentrations substantially reduce oil-water interfacial tension while enhancing interfacial shear viscosity and elasticity, effectively stabilizing emulsified droplets. The influence of increasing sodium carbonate concentration exhibits greater complexity: at concentrations below 1.00 wt% Na_2CO_3 , emulsion stability decreases with increasing concentration, whereas at 1.20 wt% concentration, oil phase droplet stability improves significantly, attributed to altered ionic strength and interfacial tension variations in the aqueous phase.

Keywords

Multiple Light Scattering Method, Emulsion, Petroleum Sulfonate, Partially Hydrolyzed Polyacrylamide

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在油田开发的生命周期内,通过一次采油和二次采油可使采出率达到40%以上[1],为了进一步提高油田的最终采出程度,三元复合驱油技术是必不可少的提高采收率技术,矿场实验结果表明三元复合驱油技术可提高采收率18%以上[2]。三元复合驱油技术在大庆油田应用较多,强碱三元复合驱首先被研究和进行矿场应用,由于强碱三元复合驱采出系统结垢严重[3],三元复合驱的研究方向逐渐向弱碱和无碱转移[4],目前,弱碱三元复合驱逐渐成为主要的三元复合驱技术[5]。室内物理模拟实验和矿场试验均表明,三元复合驱过程中的乳化作用是影响驱油效果的重要因素[6],乳化程度高,三元复合驱提高采收率的幅度大[7],弱碱三元复合驱矿场试验结果的分析得出,弱碱三元复合体系形成的乳状液在岩心多孔介质中运移可产生“贾敏效应”增加渗流阻力[8],扩大波及体积,储层内油水乳化作用越强,弱碱三元复合驱增油降水效果越好[9]。

弱碱三元复合驱油体系的驱油剂主要是部分水解聚丙烯酰胺(简称 HPAM)、石油磺酸盐和碳酸钠。基于瓶试法的乳化稳定动力学分析得出[10],增加 HPAM 浓度或石油磺酸盐质量分数,乳状液稳定性逐

渐增加；但当碳酸钠的质量分数小于 0.8% 时，乳状液稳定性随碳酸钠浓度增加而增强，但当碳酸钠的质量分数大于 0.8% 时，增加碳酸钠浓度反而会降低乳状液的稳定性。该方法投资较少，但手工操作工作量大[11]。

多重光散射法是通过接收红外光源照射样品后的透射光强和背散射光强来获得乳状液的微观动态过程[12][13]，基于此可评价乳状液的稳定性[14]-[17]。本研究根据多重光散射法获得的透射光强和背散射光强的曲线特点，将溶液分成乳化油相和乳化水相，研究乳化水相和乳化油相的稳定性，确定驱油剂对乳化水相和乳化油相稳定性的影响规律。

2. 实验部分

2.1. 材料和仪器

原油：采出井口脱水原油；污水：将注入污水使用滤纸过滤获得；聚合物：部分水解聚丙烯酰胺（简称 HPAM），有效含量约为 90%，粘均分子量约为 1.9×10^7 ，大庆炼化公司生产；石油磺酸盐：有效含量约为 40%，大庆炼化公司生产； Na_2CO_3 ：分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司生产。

LC-OES-60 型悬臂式电动搅拌器，上海力辰邦西仪器有限公司生产；HR-500DG 型均化仪，上海沪析实业有限公司生产；Turbiscan Tower 型多重光散射仪，法国 Formulation 公司生产；TX-500C 型旋转滴界面张力仪，CNG 公司生产。

2.2. 实验方法

2.2.1. 弱碱三元溶液的配制

使用 500 mL 烧杯称取 298.33 g 污水使用悬臂式电动搅拌器搅拌，称取 1.67 g HPAM 干粉均匀撒入正在搅拌的污水中，搅拌 2 h 后 5000 mg/L 的聚合物溶液，按照实验设计方案将聚合物溶液、石油磺酸盐、 Na_2CO_3 和污水混合并搅拌 30 min 获得弱碱三元溶液。

2.2.2. 界面张力的测定

参照 SY/T 5370-2018《表面及界面张力测定方法》中的旋转滴法测定界面张力。取一定量待测的弱碱三元溶液注入到检测用毛细管中，以原油为油相，使用旋转滴界面张力仪在 45℃ 恒温条件下以 5000 r/min 检测界面张力随时间变化，至界面张力基本不变时停止，即最终的界面张力。

2.2.3. 乳状液的制备

取 16 mL 弱碱三元溶液与 4 mL 原油混合，45℃ 预热 30 min，使用 HR-500DG 型均化仪以 11,000 r/min 均化 1 min，获得乳状液。

2.2.4. 多重光散射法评价乳状液稳定性

将制备的乳状液装入多重光散射仪专用瓶中，45℃ 恒温条件下静沉 60 min，检测静沉不同时间的透射光和背散射光曲线，使用 Turbiscan Tower 多重光散射仪的 TowerSoft 软件进行数据的分析。本研究中，弱碱三元溶液静沉后具有一定的透光性，而原油无透光性，因此选择透射光强为 0.01% 的点作为分界点，将整个溶液分成油相和水相两部分[11][17]，见图 1。对于水相，选择透射光强平均值(T_{avg})进行表征，透射光强平均值表示某一时间透过水相溶液的各位置的光强平均值，透射光强平均值越小，乳化液滴越多，乳化程度越大；反之，乳化程度越小。对于油相，原油和油相乳化液滴均不透光，原油也不发生光的散射，但乳化液滴则会发生光的散射，因此选择背散射光强平均值(BS_{avg})进行表征，表示某一时间背散射光检测器接收到的油相溶液的各位置的背散射光强的平均值，背散射光强平均值越大，乳化液滴越多，乳化程度越大；反之，乳化程度越小。

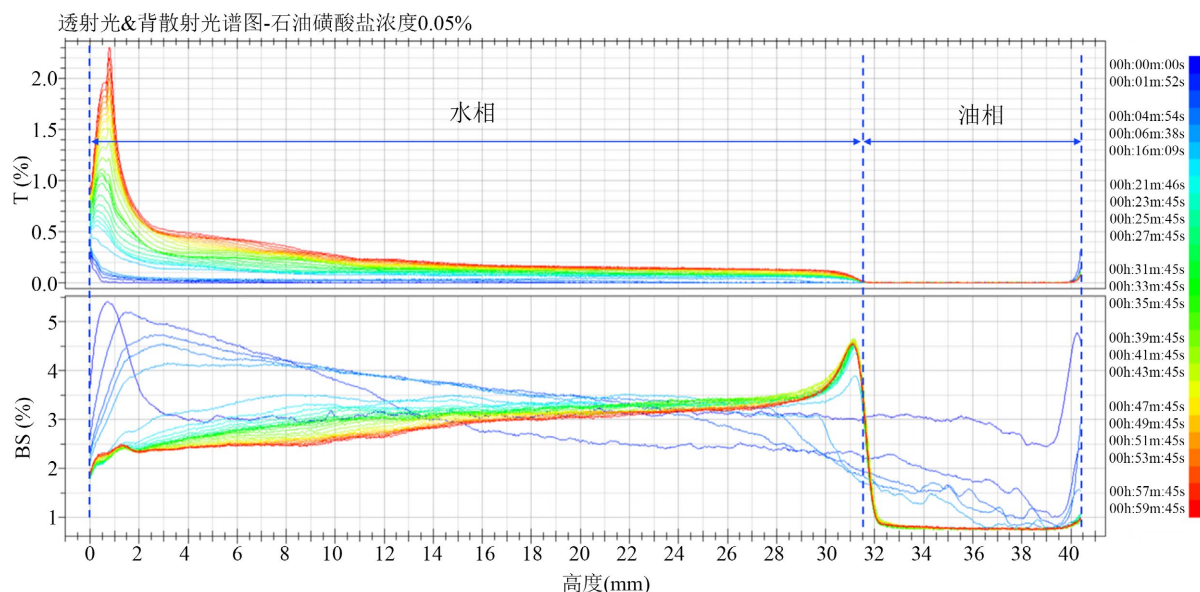


Figure 1. Oil phase area and water phase area division diagram

图 1. 油相区域和水相区域划分示意图

3. 结果与讨论

3.1. 聚合物浓度对乳状液稳定性的影响

固定石油磺酸盐浓度为 0.2%、 Na_2CO_3 浓度为 1.2%，聚合物浓度分别为 400、600、800 和 1000 mg/L，按照 2.2.1 和 2.2.2 制备乳状液，按照 2.2.3 使用多重光散射法评价乳状液稳定性，结果见图 2 和图 3。

从图 2 可知，随着聚合物浓度增加，水相 T_{avg} 逐渐降低，说明增加聚合物浓度会提高水相乳化液滴的稳定性。由图 2 还可知，随着时间静沉时间延长， T_{avg} 逐渐增大，这说明水相乳化液滴逐渐减少，水相乳化程度逐渐降低。乳状液在静沉过程中，水相的乳化液滴发生了上浮、聚集和聚并作用，进而 T_{avg} 逐渐上升，计算图 2 中 T_{avg} 的斜率可获得破乳速率[17]来表征水相乳化液滴上浮、聚集和聚并的综合能力，破乳速率越大，乳化液滴的稳定性越差，结果见表 1。

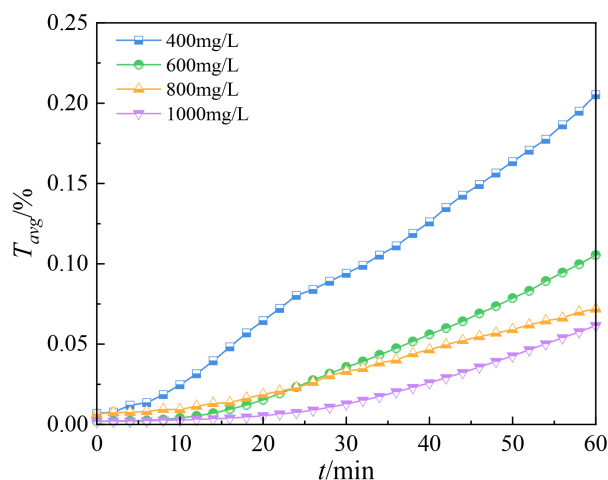


Figure 2. Effect of polymer concentration on aqueous phase T_{avg} of weak base ASP emulsion system

图 2. 聚合物浓度对弱碱三元乳化体系的水相 T_{avg} 影响

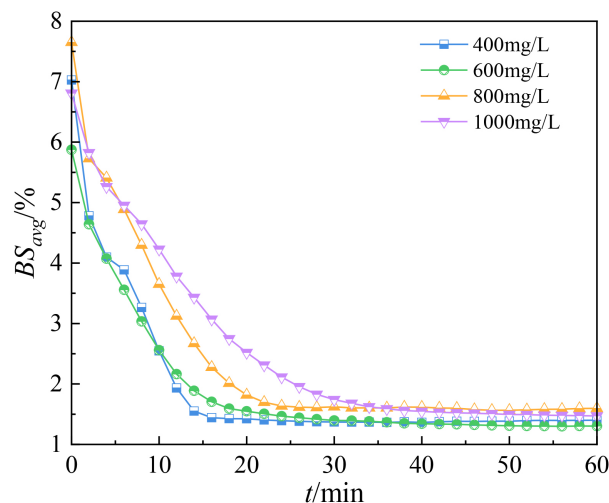


Figure 3. Effect of polymer concentration on BS_{avg} of oil phase in weak base ASP emulsion system
图 3. 聚合物浓度对弱碱三元乳化体系的油相 BS_{avg} 影响

Table 1. Solution viscosity and demulsification rate of aqueous emulsion droplets of weak base ASP emulsion systems with different polymer concentrations

表 1. 不同聚合物浓度的弱碱三元乳化体系的溶液粘度和水相乳化液滴的破乳速率

聚合物浓度(mg/L)	400	600	800	1000
破乳速率(%/min)	0.00336	0.00182	0.00119	0.00100
R^2	0.9958	0.9646	0.9818	0.8947
溶液粘度(mPa·s)	3.9	5.9	9.4	12.9

从表 1 可知,随着聚合物浓度的增加,水相乳化液滴的破乳速率逐渐减小,聚合物浓度从 400 mg/L 增加到 1000 mg/L 时,弱碱三元乳化体系中 O/W 型乳化液滴的破乳速率由 0.00336%/min 降低到 0.00100%/min,说明提高聚合物浓度,水相乳化液滴破乳难度加大,水相乳化液滴的稳定性提高。这是因为聚合物浓度增加后,水相溶液粘度增大,聚合物浓度从 400 mg/L 增加到 1000 mg/L 时,弱碱三元溶液的粘度由 3.9 mPa·s 增加到 12.9 mPa·s,根据 Stocks 定律[14],溶液粘度增加,乳化液滴的运动速度减慢。

从图 3 可知,随着静沉时间的延长,油相 BS_{avg} 先逐渐降低然后基本平稳,说明延长静沉时间有利于油相乳化液滴的聚集和聚并。从 BS_{avg} 曲线的变化规律可知,随着聚合物浓度增加, BS_{avg} 达到平稳的时间逐渐延长,说明增加聚合物浓度将提高油相乳化液滴聚集和聚并的难度。

T_{avg} 和 BS_{avg} 的研究结果均表明,提高聚合物浓度,乳化液滴的聚集、聚并难度均增大,一方面是因为部分水解聚丙烯酰胺为水溶性聚合物,聚合物浓度的提高将提高溶液粘度,进而使乳化液滴的运移速度减慢,降低聚集能力,另一方面部分水解聚丙烯酰胺由酰胺基和羧基组成,聚合物分子会在油水界面发生聚集,提高界面剪切粘度和界面弹性,乳化液滴的聚并难度加大,进而提高乳化液滴的稳定性。

3.2. 石油磺酸盐对乳状液稳定性的影响

固定聚合物浓度为 800 mg/L、 Na_2CO_3 浓度为 1.2%,石油磺酸盐浓度分别为 0.05%、0.10%、0.20%、0.30%和 0.40%,按照 2.2.1 和 2.2.2 制备乳状液,按照 2.2.3 使用多重光散射法评价乳状液稳定性,结果见图 4 和图 5。

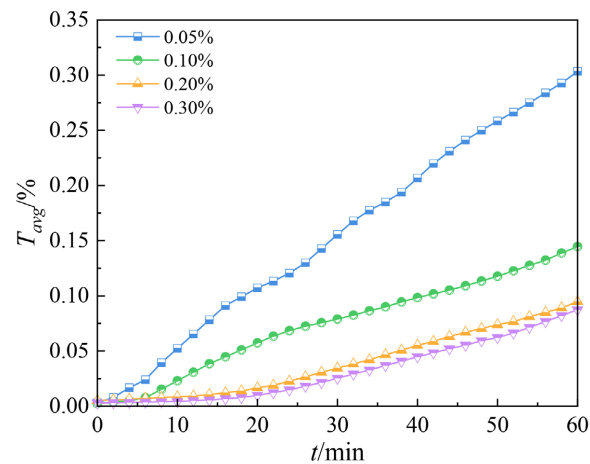


Figure 4. Effect of petroleum sulfonate concentration on aqueous phase T_{avg} of weak base ASP emulsion system
图 4. 石油磺酸盐浓度对弱碱三元乳化体系的水相 T_{avg} 影响

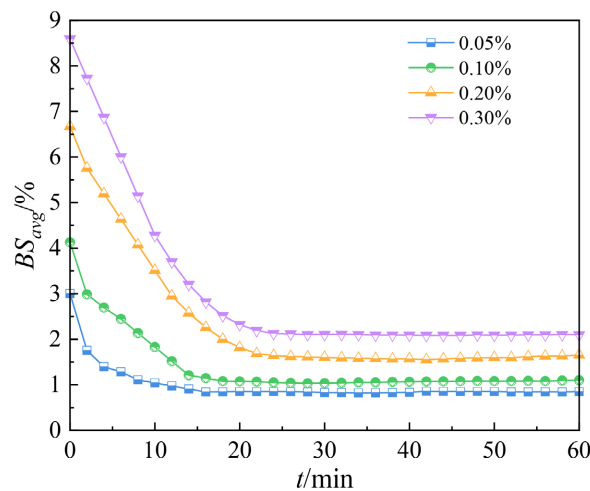


Figure 5. Effect of petroleum sulfonate concentration on oil phase BS_{avg} of weak base ASP emulsion system
图 5. 石油磺酸盐浓度对弱碱三元乳化体系的油相 BS_{avg} 影响

由图 4 可知,随着静沉时间的延长,水相 T_{avg} 逐渐增大,说明延长静沉时间会促进水相乳化液滴上浮、聚集和聚并,进而 T_{avg} 增大。对比不同石油磺酸盐浓度的 T_{avg} 曲线可知,随着石油磺酸盐浓度的增加, T_{avg} 主要呈下降趋势,说明提高石油磺酸盐浓度可提高水相乳化液滴的稳定性。计算图 4 中 T_{avg} 的斜率可获得破乳速率,见表 2。由表 2 可知,随着石油磺酸盐浓度增加,破乳速率逐渐降低,说明提高石油磺酸盐浓度,水相乳化液滴的稳定性逐渐增强。

Table 2. Interfacial tension of weak base ASP emulsion system with different petroleum sulfonate concentrations and demulsification rate of aqueous emulsion droplets

表 2. 不同石油磺酸盐浓度的弱碱三元乳化体系的界面张力和水相乳化液滴的破乳速率

石油磺酸盐浓度(%)	0.05	0.10	0.20	0.30
破乳速率(%/min)	0.00511	0.00236	0.00159	0.00146
R^2	0.9983	0.9878	0.9643	0.9408
界面张力(mN/m)	0.0545	0.0186	0.0035	0.0028

从图 5 可知,随着静沉时间的延长,油相 BS_{avg} 逐渐降低,说明延长静沉时间将促进油相乳化液滴的聚集和聚并。对比 60 min 时 BS_{avg} 可知,随着石油磺酸盐浓度增加, BS_{avg} 逐渐增加,说明提高石油磺酸盐浓度将提高油相乳化液滴的整体稳定性。

T_{avg} 和 BS_{avg} 的研究结果均表明,随着石油磺酸盐浓度的增加,乳状液稳定性增强。这是因为石油磺酸盐是一种两亲性分子,当石油磺酸盐浓度为 0.05% 时,弱碱三元溶液的界面张力为 0.0545 mN/m,提高石油磺酸盐浓度,可以进一步降低界面张力,当石油磺酸盐浓度达到 0.0035 mN/m 时,界面张力降至 0.0035 mN/m,界面张力达到了 10^{-3} mN/m 数量级,说明提高石油磺酸盐浓度可以促进石油磺酸盐分子在油水界面的紧密排列,油水界面的界面剪切粘度和界面弹性模量均增加,进而乳化液滴的稳定性增强,乳状液的整体稳定性增加[10]。

3.3. Na_2CO_3 对乳状液稳定性的影响

固定聚合物浓度为 800 mg/L、石油磺酸盐浓度为 0.2%, Na_2CO_3 浓度分别为 0.6%、0.8%、1.0%、1.2%,按照 2.2.1 和 2.2.2 制备乳状液,按照 2.2.3 使用多重光散射法评价乳状液稳定性,结果见图 6 和图 7。

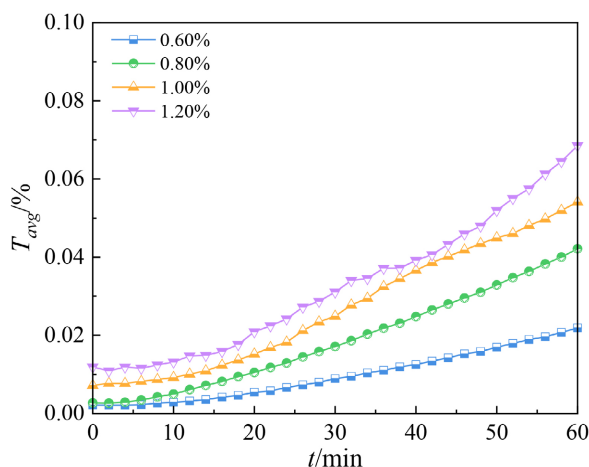


Figure 6. Effect of Na_2CO_3 concentration on the aqueous phase T_{avg} of weak base ASP emulsion system
图 6. Na_2CO_3 浓度对弱碱三元乳化体系的水相 T_{avg} 影响

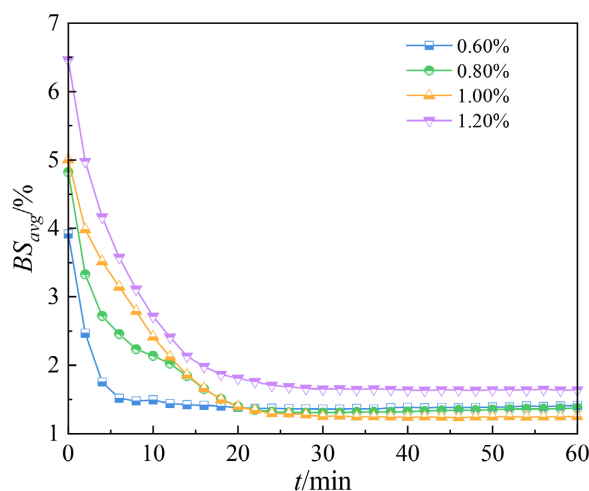


Figure 7. Effect of Na_2CO_3 concentration on oil phase BS_{avg} of weak base ASP emulsion system
图 7. Na_2CO_3 浓度对弱碱三元乳化体系的油相 BS_{avg} 影响

从图 6 可知,随着静沉时间的延长, T_{avg} 逐渐增加,说明乳化液滴通过上浮、聚集和聚并作用逐渐减少;对比不同 Na_2CO_3 浓度的 T_{avg} 曲线可知,随着 Na_2CO_3 浓度的提高, T_{avg} 逐渐增加,说明提高 Na_2CO_3 浓度会降低水相乳化液滴的稳定性,导致 T_{avg} 增加。计算图 6 中 T_{avg} 的斜率可获得破乳速率,见表 3。由表 3 可知,随着 Na_2CO_3 浓度增加,破乳速率逐渐减小。对比 0 min 时 T_{avg} 可知,随着 Na_2CO_3 浓度增加, T_{avg} 逐渐增加,说明提高 Na_2CO_3 将减少初始时期的水相乳化液滴。

Table 3. Interfacial tension and demulsification rate of aqueous emulsion droplets of weak base ASP emulsion systems with different Na_2CO_3 concentrations

表 3. 不同 Na_2CO_3 浓度的弱碱三元乳化体系的界面张力和水相乳化液滴的破乳速率

Na_2CO_3 浓度(%)	0.60	0.80	1.00	1.20
破乳速率(%/min)	9.548×10^{-4}	8.572×10^{-4}	6.826×10^{-4}	3.436×10^{-4}
R^2	0.9662	0.9792	0.9837	0.9726
界面张力(mN/m)	0.00793	0.00767	0.00731	0.00730

从图 7 可知,随着静沉时间的延长,油相 BS_{avg} 逐渐降低,说明延长静沉时间将促进油相乳化液滴的聚集和聚并。对比 60 min 的 BS_{avg} 可知, Na_2CO_3 对 BS_{avg} 的影响规律主要呈先降低后升高的趋势, Na_2CO_3 浓度为 1.00% 时 BS_{avg} 相对最低,说明其油相乳化液滴稳定性最差。

T_{avg} 和 BS_{avg} 的研究结果表明,当 Na_2CO_3 浓度 $\leq 1.00\%$ 时,随着 Na_2CO_3 浓度增加,水相和油相的乳化液滴稳定性减弱,这是因为 Na_2CO_3 浓度增加后,水相离子强度发生变化,界面张力降低(表 3),石油磺酸盐分子在油水界面的分布情况发生变化,打破了乳化剂分子在油水界面的平衡,但增加 Na_2CO_3 浓度会降低溶液粘度,乳化液滴碰撞概率增大,进而乳化液滴稳定性减弱[10]。当 Na_2CO_3 浓度增加到 1.20% 时,水相乳化液滴的稳定性继续下降,但油相乳化液滴的稳定性增强,这是因为受 Na_2CO_3 浓度变化的影响,石油磺酸盐分子在油水两相的分配比例发生变化,分配在油相的石油磺酸盐分子增多[18],因此水相乳化液滴稳定性减弱但油相乳化液滴稳定性增强,

4. 结论

在本研究中,通过多重光散射法深入探讨了弱碱三元驱油剂对乳状液稳定性的影响。聚合物浓度是影响三元液粘度的决定性因素,随着聚合物浓度的增加,溶液粘度显著增大。提高聚合物浓度,乳化液滴的聚集、聚并难度均增大,水相乳化液滴的稳定性逐渐增强,油相乳化液滴达到稳定的时间延长。石油磺酸盐浓度的增加可显著降低油水界面张力,乳状液的 T_{avg} 逐渐降低, BS_{avg} 逐渐增加,水相乳化液滴的破乳速率下降,表明乳化液滴的稳定性显著增强。随着 Na_2CO_3 浓度的增加,乳状液的 T_{avg} 逐渐增加,表明水相乳化液滴的稳定性降低。然而, Na_2CO_3 浓度对油相乳化液滴的稳定性影响呈现先降低后增加的趋势,当 Na_2CO_3 浓度为 1.20% 时,油相乳化液滴的稳定性增强。油田乳状液形成过程中,除了驱油剂外还有原油乳化剂、粘土颗粒等乳化剂,后续需要进一步研究不同因素对乳状液稳定性的影响。

基金项目

大庆市指导性科技计划项目“乙撑胺聚碳酸酯的合成及其破乳效果构效关系研究”(编号: zd-2024-67)。

参考文献

[1] 孙龙德, 江同文, 王凤兰, 等. 关于油田寿命的思考[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 56-63.
[2] 孙龙德, 伍晓林, 周万富, 等. 大庆油田化学驱提高采收率技术[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 636-645.

- [3] Guo, H., Li, Y., Wang, F. and Gu, Y. (2017) Comparison of Strong-Alkali and Weak-Alkali Asp-Flooding Field Tests in Daqing Oil Field. *SPE Production & Operations*, **33**, 353-362. <https://doi.org/10.2118/179661-pa>
- [4] Sun, L., Wu, X., Zhou, W., Li, X. and Han, P. (2018) Technologies of Enhancing Oil Recovery by Chemical Flooding in Daqing Oilfield, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, **45**, 673-684. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(18\)30071-5](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(18)30071-5)
- [5] Guo, H., Li, Y., Kong, D., Ma, R., Li, B. and Wang, F. (2018) Lessons Learned from Alkali/Surfactant/Polymer-Flooding Field Tests in China. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **22**, 78-99. <https://doi.org/10.2118/186036-pa>
- [6] Zhou, Y., Yin, D., Chen, W., Liu, B. and Zhang, X. (2019) A Comprehensive Review of Emulsion and Its Field Application for Enhanced Oil Recovery. *Energy Science & Engineering*, **7**, 1046-1058. <https://doi.org/10.1002/ese3.354>
- [7] 苏禹, 李根, 陈宇豪, 等. 乳化程度对复合体系提高采收率的影响[J]. 石油化工, 2022, 51(1): 62-68.
- [8] 孙哲, 卢祥国, 孙学法, 等. 弱碱三元复合驱增油效果影响因素及其作用机理研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2018, 31(1): 35-42.
- [9] 姜丽丽. 乳化作用对弱碱三元复合驱增油效果的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(4): 119-124.
- [10] 王俊, 宋程, 李翠勤, 等. 三元组分对弱碱三元复合驱模拟乳状液乳化稳定性的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 146-154.
- [11] 黄金. 聚碳酸酯类破乳剂可控合成及性能研究[D]: [博士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2024.
- [12] Mengual, O. (1999) TURBISCAN MA 2000: Multiple Light Scattering Measurement for Concentrated Emulsion and Suspension Instability Analysis. *Talanta*, **50**, 445-456. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(99\)00129-0](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(99)00129-0)
- [13] Mengual, O., Meunier, G., Cayre, I., Puech, K. and Snabre, P. (1999) Characterisation of Instability of Concentrated Dispersions by a New Optical Analyser: The TURBISCAN MA 1000. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **152**, 111-123. [https://doi.org/10.1016/s0927-7757\(98\)00680-3](https://doi.org/10.1016/s0927-7757(98)00680-3)
- [14] Wang, K., Zhang, B. and Li, G. (2018) Effects of Weak-Alkali ASP Composition on the Stability of O/W Emulsions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **41**, 438-450. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1520328>
- [15] 张和悦, 高清河, 王鉴, 等. 驱油剂对弱碱三元复合驱乳状液稳定性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15440-15445.
- [16] Niu, H., Wang, W., Dou, Z., Chen, X., Chen, X., Chen, H., et al. (2023) Multiscale Combined Techniques for Evaluating Emulsion Stability: A Critical Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, **311**, Article ID: 102813. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102813>
- [17] Huang, J., Ma, X., Li, H., Liu, M., Gao, Q. and Li, C. (2024) Effect of Hydrolyzed Polyacrylamide on the Emulsion Stability by Multiple Light Scattering and Molecular Dynamics Simulation. *Macromolecular Theory and Simulations*, **33**, Article ID: 2400040. <https://doi.org/10.1002/mats.202400040>
- [18] 田翠娟. 石油磺酸盐在油水两相分配规律研究[J]. 石油规划设计, 2018, 29(1): 15-17, 48.